

УДК 621.77

Л. И. Зайнуллина^{*}, И. В. Александров

Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа

^{*}ZaynullinaLI@yandex.ru

Научный руководитель — проф., д-р физ.-мат. наук И. В. Александров

ВЛИЯНИЕ ЭДУ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛАТУНИ, ПОДВЕРГНУТОЙ ИПД

В настоящей работе представлены результаты исследования прочностных свойств модельного однофазного сплава Cu—30 масс. % Zn, обладающего низким значением энергии дефекта упаковки (ЭДУ) $14 \text{ мДж} \cdot \text{м}^{-2}$. После проведения равноканального углового прессования (РКУП) с последующей прокаткой в микроструктуре были сформированы наноразмерные двойники. Прокатка сплава приводит к увеличению прочности за счет измельчения размера структурных элементов.

Ключевые слова: энергия дефекта упаковки, двойники деформации, РКУП, прочность

L. I. Zaynullina, I. V. Alexandrov

INFLUENCE OF SFE ON MECHANICAL PROPERTIES OF BRASS, SUBJECTED TO SPD

In this paper presents the results of investigation the strength properties of the model single-phase Cu—30 wt. % Zn alloy, which has a low stacking fault energy (SFE) of $14 \text{ mJ} \cdot \text{m}^{-2}$. After ECAP and subsequent rolling nanoscale twins were formed in the microstructure. Rolling the alloy leads to strength increasing due to decrease structural elements size.

Key words: stacking fault energy, deformation twins, ECAP, strength

Известно, что величина ЭДУ существенным образом влияет на процессы измельчения структуры, а значит и на прочностные свойства материалов. Данный эффект был изучен для материалов с ультрамелкозернистой (УМЗ) структурой, полученной в результате

интенсивной пластической деформации (ИПД). ИПД была реализована с использованием таких методов как РКУП, интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК). Однако, данные исследования проводились на УМЗ металлах и сплавах со средней или высокой ЭДУ, в которых механизм деформации считается обусловленным дислокационной активностью. Меньшее внимание уделялось УМЗ металлам и сплавам с низкой ЭДУ, в которых при деформации значительно возрастает роль двойникования и образования полос сдвига. Механизмы деформации и их роль в формировании свойств УМЗ материалов при реализации такого важного промышленного технологического процесса как прокатка также практически не исследованы. При этом не установлены механизмы эволюции микроструктуры и свойств. Сложность обусловлена применением комплексной обработки, так как первоначально сплавы подвергаются РКУП вплоть до достижения УМЗ состояния, а затем — прокатке. Изменение режима деформации с РКУП на прокатку может инициировать новые дислокационные системы скольжения и двойникования в связи с изменением напряженно-деформированного состояния.

В работе представлены результаты исследования прочностных свойств модельного однофазного ГЦК сплава $\text{Cu}-30 \text{ масс. \% Zn}$, подвергнутого РКУП с последующей плоской прокаткой. Полученные результаты для данного материала, обладающего низким значением ЭДУ ($14 \text{ мДж} \cdot \text{м}^{-2}$), сопоставлены с результатами, полученными для чистой УМЗ, меди с высоким значением ЭДУ, равным $78 \text{ мДж} \cdot \text{м}^{-2}$.

Подготовленные образцы сплава подвергали одному и двум проходам РКУП при $T = 300^\circ\text{C}$ в оснастке с углом пересечения каналов $\varphi = 90^\circ$ по маршруту V_C . Далее заготовки, нагретые до такой же температуры, многократно пропускали между вращающимися валками прокатного стана до достижения степени обжатия 90 %.

Для изучения тонкой структуры использовали просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) JEM-2100. Образцы для исследования были вырезаны параллельно плоскости прокатки. Прочностные свойства были изучены на пропорциональных плоских образцах с длиной рабочей части 4 мм со скоростью растяжения 0,24 мм/мин на разрывной машине Instron 8801 при комнатной температуре.

В работе [1] были исследованы структурные изменения в чистой меди, подвергнутой 1–10 проходам РКУП при комнатной температуре, а также последующей плоской прокатке до достижения степени

обжатия 90 %. Показано, что прокатка вызывает значительные изменения в ранее сформированной после РКУП микроструктуре. Преобразование равноосной структуры в пластинчатую вызвано геометрическими эффектом деформации, то есть существующие равноосные или вытянутые в направлении сдвига зерна/субзерна изменили свою форму. Однако во время прокатки дополнительного измельчения зерна, с точки зрения формирования новых границ, практически не произошло. По мере увеличения числа проходов РКУП предел прочности достиг значения 402 ± 11 МПа, что хорошо согласуется с результатами, полученными в работе [2]. Стоит отметить, что дальнейшее проведение плоской прокатки привело к повышению предела прочности до 485 ± 14 МПа из-за уменьшения расстояния между границами зерен/субзерен в соответствии с соотношением Холла — Петча.

В результате РКУП сплава Cu–30 масс. % Zn микроструктура существенно изменилась. После одного прохода РКУП средний размер зерен/субзерен уменьшился с 120 ± 20 мкм до 50 ± 7 мкм, после двух проходов РКУП средний размер структурных элементов составил 290 ± 55 нм. Стоит отметить, что исследования тонкой структуры образцов сплава выявили наличие деформационных двойников, в отличие от чистой меди после такой же деформации. По мере увеличения числа проходов размер двойников в сплаве уменьшился. Дальнейшая прокатка привела к еще большему измельчению структуры. При достижении степени обжатия 90 % средний размер структурных элементов равен 160 ± 7 нм. Наноразмерные зерна/субзерна также содержали деформационные двойники.

Известно, что основным механизмом деформации ГЦК металлов является дислокационное скольжение. Измельчение зерна происходит за счет скольжения, накопления, взаимодействия, пересечения и пространственной перестройки дислокаций. При добавлении атомов цинка в твердый раствор меди ЭДУ уменьшается, и это препятствует перегруппировке (поперечному скольжению и переползанию) дислокаций. Критическое напряжение сдвига для деформации двойникованием становится ниже, чем для скольжения. Следовательно, двойникование становится доминирующим механизмом деформации. Стоит отметить, что проведение РКУП повышает предел прочности с 168 ± 11 МПа в исходном состоянии до 590 ± 53 МПа после двух проходов. Плоская прокатка со степенью обжатия 90 % после двух проходов РКУП позволила повысить предел прочности до 730 ± 65 МПа

или в 4,3 раза по сравнению с исходным состоянием. Сравнивая результаты механических свойств сплава с результатами, полученными для чистой меди, можно сделать вывод о доминирующей роли ЭДУ в формировании высокого уровня предела прочности в сплаве. Сформированные двойниковые границы в сплаве могут разделять исходное зерно на новую, более усовершенствованную микроструктуру. Другими словами, снижение ЭДУ приводит к более развитому измельчению зерна, что, в свою очередь, обеспечивает повышение прочностных характеристик.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 19–33–90109.*

Литература

1. Effect of cold rolling on microstructure and mechanical properties of copper subjected to ECAP with various numbers of passes / N. D. Stepanov [et al.] // Mat. Sci. and Eng. A. 2012. 554. P. 105–115.
2. Microstructure and mechanical properties of Cu and Cu–Zn alloys produced by equal channel angular pressing / Z. J. Zhang [et al.] // Mat. Sci. and Eng. A. 2011. 528. P. 4259–4267.